

出國報告（出國類別：移地研究）

赴中國成都參加短期移地交流心得報告

服務機關：交通部中央氣象局

姓名職稱：蔡旻倩技士

派赴國家：中國成都

出國期間：107年5月4日至18日

報告日期：107年7月31日

摘要

中央氣象局（以下簡稱本局）發展地震預警與地震前兆等相關工作及研究由來已久，尤其是在前兆與地殼形變等地球物理相關研究方面已具有不錯的成績。近年臺灣地區地震災害頻仍，如 2016 年的美濃地震與 2017 年的花蓮地震皆造成大樓倒塌及人員傷亡之災損，因此瞭解地質相關地體構造以及延伸到地質地震災害科技發展相當重要。本次短期移地交流，蔡旻倩技士係前往成都西南交通大學地球科學與環境工程學院學習最新的 GNSS 解算技術，並受邀參加「2018 年第 4 屆國際汶川地震紀念研討會」及發表研究論文，最後於成都理工大學之重點實驗室交流最新天然災害防災科技。

本次的移地研究地點都在成都，但整體而言蔡員參訪了兩間大學並於一國際研討會給予邀請演講，不僅可以幫助瞭解國際上地球科學發展之最新趨勢，且於本局相關之地震預警、震前兆分析等技術開發，甚至是防災相關等重點研究皆有助益。尤其利用他國經驗，通過短期交流評估臺灣在實際防災應用的情形與效益，有助本局未來業務規劃之參考。本文將介紹於成都短期交流之過程，並提供研討會後心得及建議。

目次

一、目的	4
二、過程	7
三、與會心得	21
四、建議	23
附錄一、交流點滴及照片	24

一、目的

臺灣位於歐亞板塊之大陸邊緣及菲律賓海板塊之呂宋島弧間，晚中新世以來的斜向聚合，頻繁的地震活動與快速大地變形顯示臺灣正處於活躍的構造運動中。近百年來臺灣地區所曾發生多次重大災害性地震（例如：1906年梅山地震，1941年中埔地震，1964年白河地震，1999年之集集地震等，圖1）。全球衛星定位系統（Global Positioning System，GPS）原是美國海軍於1973年為了軍事導航及定位的需要而研發，其發展至今已有30多年。隨著美國GPS及俄羅斯GLONASS(Global Navigation Satellite System)現代化計畫展開與歐盟Galileo衛星即將發射，宣告著全球導航衛星系統(Global Navigation Satellite System，GNSS)時代來臨。GPS使用者在全世界任何時間與地點皆可將位置定到公分級的精度，而定位精度的提升，開發了許多新的應用領域，近年來，全球衛星定位系統已成為地殼變形及地體動力學研究的利器。除了常見的民用導航外，也可用於標準鐘校時、衛星軌道定位、電離層研究、大氣層水氣含量模擬、局部地層下陷觀測、地殼變形監測，或是地震前兆的相關研究。

中央氣象局地震觀測網（Central Weather Bureau Seismic Network，CWBSN）在1991年後進入細緻化的地震觀測時代，根據CWBSN各測站檢測震波之能力，其觀測效能已進入微震觀測程度，擁有相當豐富的地震資料可用於速報、分析或研究。在GPS連續觀測網方面，中央氣象局自2001年起與中央研究院地球科學研究所合作建立「臺灣GPS連續觀測網」，至今有超過200個連續觀測站。整體而言，目前全台由不同單位所建立運轉中的連續觀測站近乎400站（圖2），對比其他國家而言我國測站密度相當高。因此，如何有效地運用地殼變形與地震觀測資料，並進一步探討分析地殼變形與地震活動間之關連性，進而達到區域地震潛勢評估、天然災害防治、地震前兆訊號偵測、斷層活動度分析，且藉由短期移地研究之討論交流，以期進一步改進與推廣本局相關研究成果，為此次訪問的主要目標。

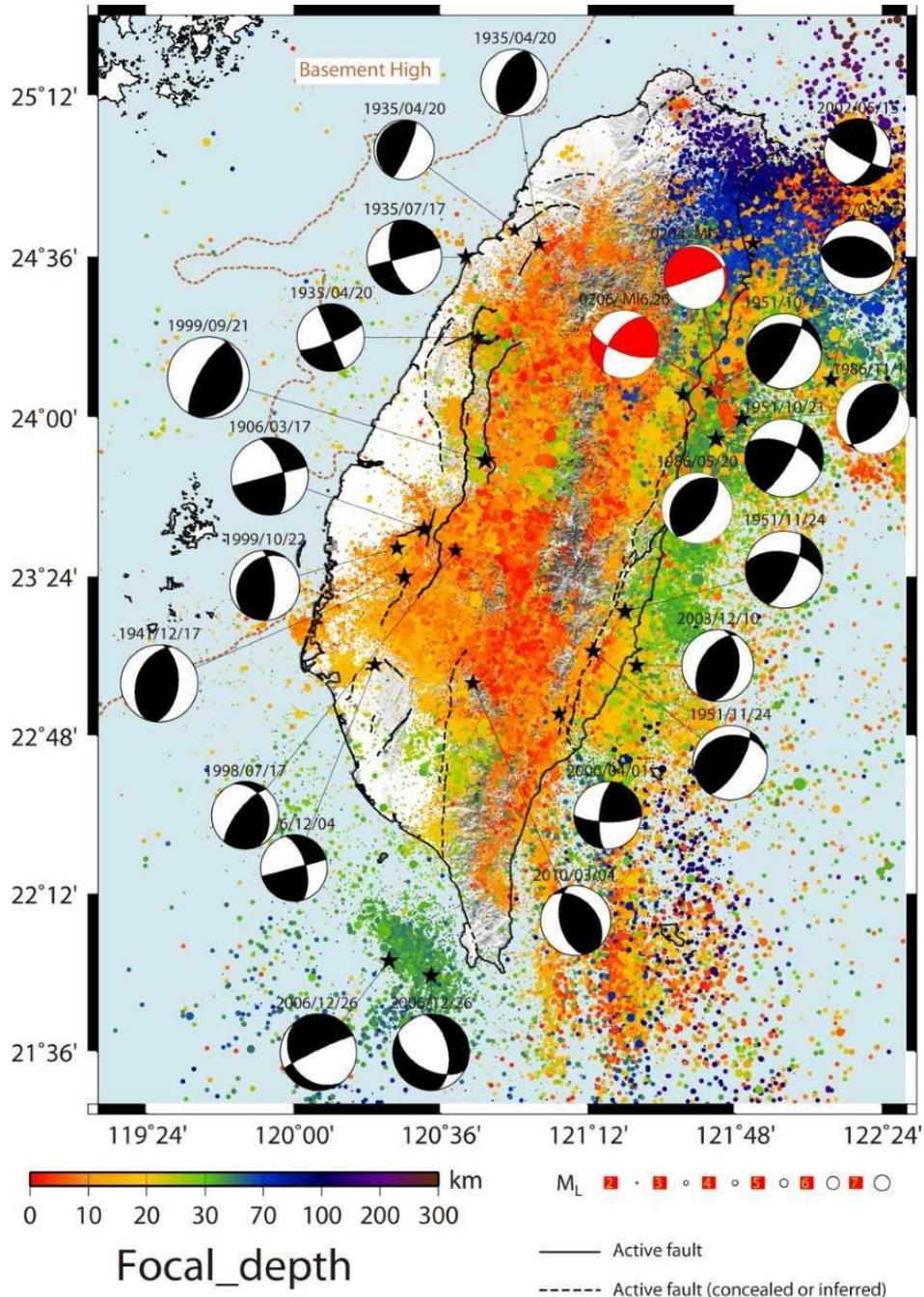


圖 1、二十世紀臺灣地區災害性地震之震央分布圖。圖中紅色星號為地震震央位置，大小分別代表不同規模，圖中可見大部分地震發生在東部與中西部地區（台中—嘉義—台南地區），東部地區的地震型態通常為典型隱沒帶地震，深度較深。大部分的淺源地震，還是以臺灣中西部為主。圖中顯示過去一世紀以來臺灣發生過 20 次以上的災害性地震。

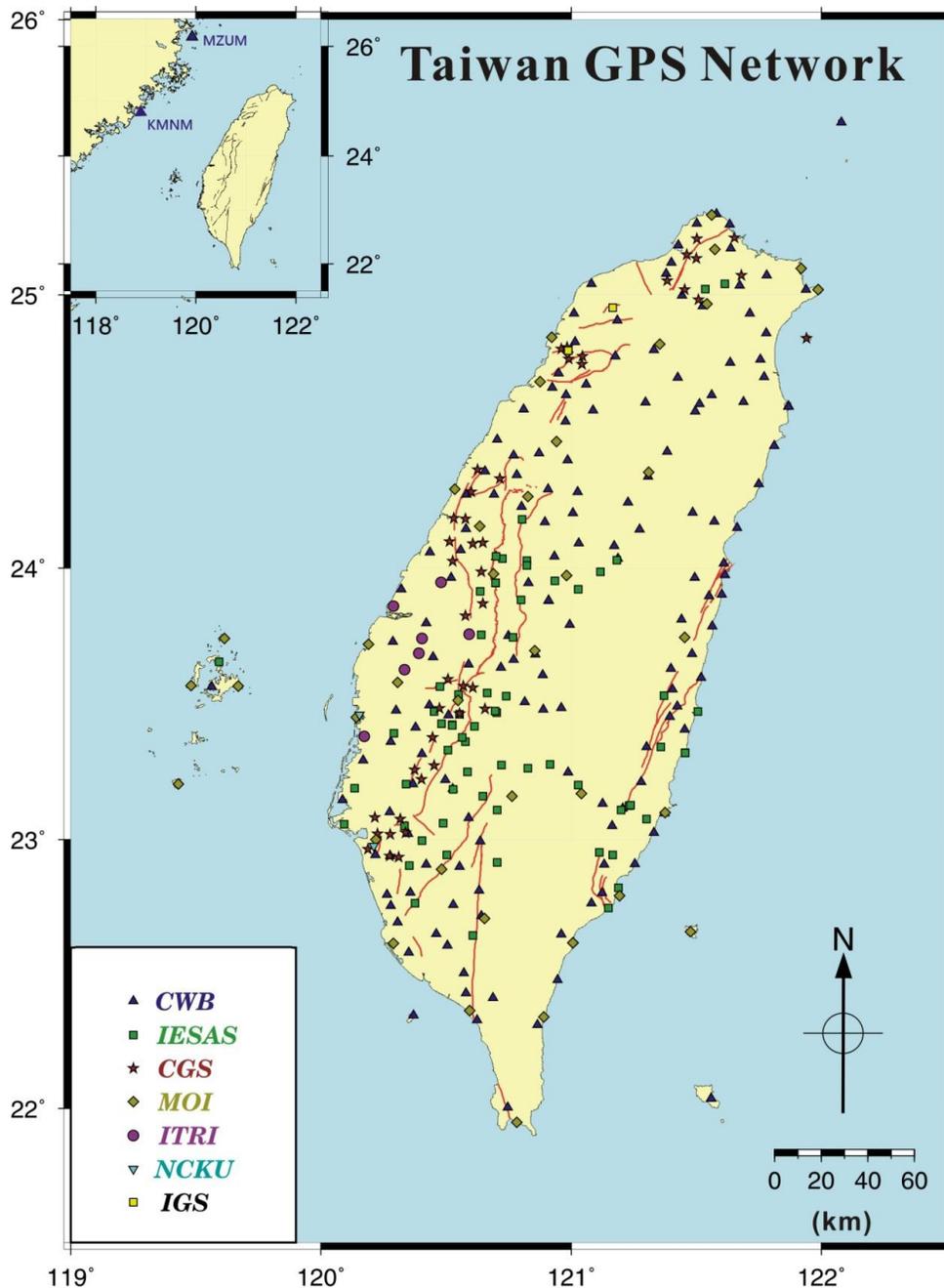


圖 2、臺灣 GPS 連續觀測網測站分布圖。不同圖形與顏色符號，分別代表不同單位之測站。其中包含交通部中央氣象局（CWB）、中央研究院地球科學研究所（IESAS）、經濟部地質調查所（CGS），內政部國土測繪中心（MOI），工業技術研究院（IRTI）、國立成功大學（NCKU），以及 IGS（International GPS Service）。

二、過程

地震監測與前兆觀測為中央氣象局重點業務之一，透過分析 GNSS 全球導航衛星系統之地殼形變，再配合地震統計資料，將可有效應用於地震前兆之相關研究。近年臺灣地區地震災害頻仍，如 2016 年的美濃地震與 2017 年的花蓮地震皆造成大樓倒塌及人員傷亡之災損，因此瞭解地質相關地體構造以致延伸到地質地震災害科技發展相當重要。本次短期移地交流，蔡技士係前往成都西南交通大學地球科學與環境工程學院學習最新的 GNSS 解算技術，並受邀參加「2018 年第 4 屆國際汶川地震紀念研討會」及發表研究論文，最後於成都理工大學之重點實驗室交流最新天然災害防災科技。

以下為蔡旻倩技士本次赴成都進行短期移地交流之行程摘要表：

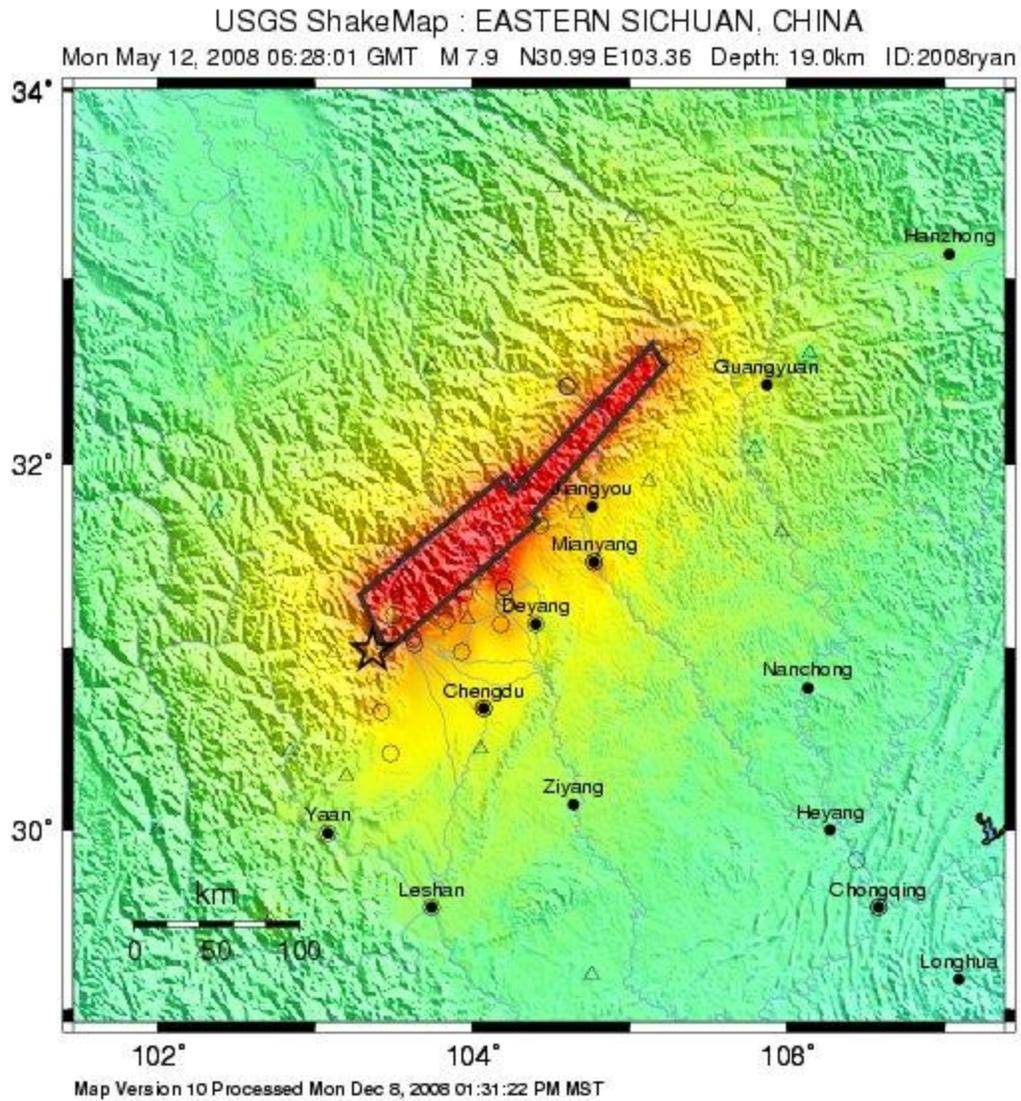
日期	地點	工作摘要
107年5月4日	桃園-中國成都	由桃園國際中正機場搭乘飛機赴中國成都。
107年5月5日 至5月11日	成都(西南交通大學)	短期研究與技術交流：GNSS解算部分
107年5月12日 至5月14日	成都	受邀參加「2018年第4屆國際汶川地震紀念研討會」並發表演講。題目：「Unravelling seismogenic structures by GNSS and SAR interferometry: from the Philippine to the southwestern Taiwan」
107年5月15日 至5月16日	成都(成都理工大學)	短期研究與技術交流：防災科技部分
107年5月17日	成都	野外參訪與實習。
107年5月18日	中國成都-桃園	由中國成都搭機返回臺灣。

其中西南交通大學（Southwest Jiaotong University, SWJTU，簡稱交大、西南交大）為歷史悠久之名校，其前身是建校於 1896 年的山海關北洋鐵路官學堂，是中國近代實際建校最早的高等學府之一。該校歷經多次改名和遷校，目前位於四川省成都市，在民國時期有「東方康奈爾」之美譽。京張鐵路與唐津鐵路的總工程師詹天佑參與奠基。中國近代交通礦冶、土木工程教育發源於該校，中國第一位建築師莊俊亦畢業於該校。西南交大現在以工為主，理、管、經、文、法多學科綜合發展、首批進入國家「211 工程」、「985 平台」、「2011 計劃」、「雙一流」和設有研究生院的教育部直屬全國重點大學。西南交大是 2000 年全國首批 16 所本科教學工作優秀的學校之一。該校總共有 3 個校區，分別為（1）犀浦校區：四川省成都市郫都區犀浦鎮犀安路 999 號(圖 3)，（2）九里校區：四川省成都市二環路北一段 111 號，與（3）峨眉校區：四川省峨眉山市景區路 1 號。本次蔡員受邀地點為該校犀浦校區之地球科學與環境科學學院，其中其系主任袁林果教授為 GNSS 之精密單點定位解算中之佼佼者，在本此參訪的過程中學習到許多不同的解算技巧，也同時學習了持久性散射體合成孔徑雷達干涉（PS-InSAR）的處理技術。



圖 3、本次參訪之西南交通大學犀浦校區正門口。走入研究室約需花費 10 分鐘時間，校區面積大、安靜，風景優美，不愧為歷史悠久的大學。

汶川地震（圖 4），也稱汶川大地震、2008 年四川大地震或 5·12 大地震，發生於北京時間（UTC+8）2008 年 5 月 12 日（星期一）14 時 28 分 04 秒，震央位於中國四川省阿壩藏族羌族自治州汶川縣映秀鎮附近、四川省城成都市西北偏西方向 79 公里處。根據中國地震局的數據，此次地震的表面波規模達 8.2、地震矩規模達 8.3（根據美國地質調查局的數據，地震矩規模為 7.9），破壞地區超過 10 萬平方公里，地震震度可能達到 11 度。本次地震的地震波圍繞地球傳播了 6 圈，地震波及大半個中國及亞洲多個國家和地區。北至遼寧，東至上海，南至香港、廣東、澳門、泰國、越南，西至巴基斯坦均有震感。截至 2008 年 9 月 18 日 12 時，汶川大地震共造成 69227 人死亡，374643 人受傷，17923 人失蹤。是中華人民共和國成立以來破壞力最大的地震，也是唐山大地震後傷亡最慘重的一次。地震造成四川、甘肅、陝西等省的災區直接經濟損失共 8451 億元人民幣，災區的衛生、住房、校舍、通訊、交通、治安、地貌、水利、生態及少數民族文化等方面受到嚴重破壞。地震災情引起民間強烈迴響，全中國以至全球紛紛捐款援助，累積金額超過 500 億元人民幣。今年適逢汶川大地震的 10 週年，所以特別舉辦 10 週年之紀念研討會，蔡員獲邀於國際會議中演講，題目為：Unravelling seismogenic structures by GNSS and SAR interferometry: from the Philippine to the southwestern Taiwan。此題目主要是在說明以菲律賓向北延伸至臺灣西南部的大型地體構造，在未來可能帶來的孕震潛勢評估與可能的相關防災運用方案。此題目來自為 2016 年的美濃地震，當時美濃地震的震央位在高雄地區，但是造成大災損的台南地區，距離震央有 20 公里之遠，造成大樓倒塌與 107 人死亡，可見臺灣西南部地區的複雜地體構造在此地震中扮演相當重要的角色，更是值得研究的對象。汶川地震的發震構造區，與臺灣西南部地區延伸至菲律賓整體大範圍的地體構造相關，所以在此研討會中，可以吸取汶川地震相關研究，應用在臺灣地區相關的地震前世評估研究，以達未來救災減災之目的。



PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Moderate/Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC.(%)	<.17	.17-1.4	1.4-3.9	3.9-9.2	9.2-18	18-34	34-65	65-124	>124
PEAK VEL.(cm/s)	<0.1	0.1-1.1	1.1-3.4	3.4-8.1	8.1-16	16-31	31-60	60-116	>116
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

圖4、汶川大地震之等震度圖，資料來源為美國地質調查所（USGS），紅色區域為震度最大之區域，其面積約2500平方公里，可想見地震發生當時慘烈的災況。

本次的10週年汶川地震紀念國際研討會，因蔡員為受邀演講講者，所以比一般講者多5分鐘口頭發表時間與討論時間。蔡員之發表內容摘要如下（圖4）：

Unravelling seismogenic structures by GNSS and SAR interferometry: from the Philippine to the southwestern Taiwan

Min-Chien Tsai^{1*} (minchyen@cwb.gov.tw), Ying-Hui Yang^{2,3}, Jyr-Ching Hu², Mario A. Aurelio⁴, Manabu Hashimoto⁵, John Agustin P. Escudero⁴, Zhe Su⁶

1. Seismological Center, Central Weather Bureau, Taipei, Taiwan
2. Department of Geosciences, National Taiwan University, Taipei, Taiwan
3. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest Petroleum University, Chengdu, China
4. National Institute of Geological Sciences, University of the Philippines, Quezon City, Philippines
5. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Kyoto, Japan
6. Key Laboratory of Crustal Dynamics, Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing, China

Key Words: GNSS, SAR interferometry, strain rate, out-of-sequence thrust, Ormoc Earthquake.

Abstract: Taiwan is located at the convergent plate boundary between Philippine Sea Plate and Eurasian Plate, with rapid crustal deformation and very high rate of seismic activity. Frequent disastrous earthquakes, including the latest Mw 6.4 Meinong event (6 February 2016) in the fold-and-thrust belt of SW Taiwan, testify to the large seismogenic potential of the island. In SW Taiwan, the horizontal velocity increases from about 40 mm/yr at Chianan to 55 mm/yr in the Kaoping area with a counterclockwise rotation, and approximately half of 80 mm/yr plate convergence rate is accommodated on the fold and thrust belt in the area. The anomalous high strain accumulations across major structures and deformation front in SW Taiwan are revealed by the Continuous GNSS and SAR interferometry. A dense continuous GNSS array composed of more than 400 stations was established by the Central Weather Bureau and the other Institutes after the 1999 Chi-Chi Earthquake. GNSS and SAR interferometry suggest that the deformation front in SW Taiwan may connect to the Manila Trench which is extended to the Philippine where is also very seimogenic, the 2017 Mw 6.5 Ormoc Earthquake in Leyte island is a case. Furthermore, the Chishan fault may connect to the splay fault bordering the lower- and upper-slope of the accretionary wedge; it could be a major seismogenic, out-of-sequence thrust (OOST) fault in SW Taiwan responsible for large magnitude earthquakes. This setting resembles that of the Nankai accretionary wedge (Japan). We use multi-sight coseismic interferograms to estimate the fault geometry and the Coulomb failure stress (CFS) of the Ormoc event. The optimal model predicts the significant positive CFS change on the NW segment of the Philippine fault in Leyte Island where is coseismic slip deficit and absent from aftershocks, which indicates this area could be high risk of future seismic hazard. In the SW Taiwan, the assessment of major seismogenic structures by considering strain accumulation between the frontal décollement (deformation front) and OOST is a crucial topic. we will use GNSS and InSAR data to re-assess the seismogeonic potential of the Chishan fault and the implications for the natural hazards in SW Taiwan.

另一所參訪大學為成都理工大學，位於中國四川省成都市成華區，由四川省人民政府和國土資源部、成都市人民政府共建，入選國家「雙一流」世界一流學科建設高校，國家「中西部高校基礎能力建設工程」、「卓越工程師教育培養計劃」、「國家建設高水平大學公派研究生項目」，為中國地球科學高層次人才培養與科學研究基地之一，是以地質、能源、資源科學、核技術及環境科學為優勢的重點大學。成都理工大學目前共有：（1）3個國家重點學科，分別為：地質資源與地質工程，礦產普查與勘探，地球探測與信息技術；（2）3個國家重點培育學科：礦物學、岩石學、礦床學；（3）15個部省級重點學科：固體地球物理學，礦物學、岩石學、礦床學，地球化學，古生物學與地層學（含古人類學），構造地質學，信號與信息處理，岩石工程，應用化學，地球探測與信息技術，油氣田開發工程，環境工程等。

最重要的是，該校擁有2個國家重點實驗室和1個教育部重點實驗室，以及7個省部級實驗室。分別為：（1）油氣藏地質及開發工程國家重點實驗室（State Key Lab of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation），（2）地質災害防治與地質環境保護國家重點實驗室（State Key Lab of Geo-hazard Prevention and Geo-environment protection），（3）地球探測與信息技術教育部重點實驗室（Key Lab of Earth Exploration & Information Techniques of Ministry of Education），（4）構造成礦成藏國土資源部重點實驗室（Key Lab of Tectonic Mineralization & Accumulation of Ministry of Land and Resources），（5）地學核技術四川省重點實驗室（Provincial Key Lab of Nuclear Techniques in Geosciences），（6）地學空間信息技術國土資源部重點實驗室（Key Lab of Geo-Spatial Information Technology of Ministry of Land and Resources），與（7）數學地質四川省重點實驗室（Provincial Key Lab of Mathematical Geology）。本次蔡員即是受到地質災害防治與地質環境保護國家重點實驗室所邀請，參與防災相關的交流討論會。

最後的行程為參與地質野外研究考察，地質考察對於防災是相當重要的一環，因為天然災害所早成的災損只有到當地考察方能知道真正的災損情況，並有助於瞭解可能的致災機制，與歷史相關事證考察。從教育的觀點出發，透過野外的考察活動，學習者能得到最直接的體驗與最具體的學習。而由於國民教育階段的學生尚未具備完全抽象思考的能力，需要具體而直接的學習經驗，因此這種自然的體驗當更為必要。這次考察地區主要為汶川地震的重點災區，收穫豐碩。

成都約2星期的短期交流過程中，學習到許多新的知識，可以運用於本局業務，內容分述如下：

(一) 持久性散射體合成孔徑雷達干涉 (PS-InSAR) 之防災應用：

偵測地表變形的測量方法很多，如地面測量、航空攝影測量、全球衛星定位系統及空載光達 (Light Detection And Ranging; LiDAR) 等，皆可用來研究變形前後的地貌變化。而遙測學上另有一項以合成孔徑雷達干涉技術 (Interferometry SAR; InSAR) 及合成孔徑雷達差分干涉技術 (Differential InSAR; DInSAR) 來產製數值地形模型 (Digital Terrain Model; DTM) 與變形量測的方法，其受雲、霧水氣等的影響量小、提供大範圍的量測資訊、可較快速得到突發的地表起伏變化 (如山崩、地震) 及緩慢的地表起伏變化 (如地層下陷) 等。所謂InSAR 是利用同一地區不同時間所拍攝之兩幅影像進行干涉處理，可產生高精度之DTM，其主要概念為解算影像像對中，對應像元間雷達回波訊號之振幅 (Amplitude) 與相位 (Phase)，並回復 (Unwrapping) 影像像對之間的相位差，即可獲得大面積之DTM。合成孔徑雷達差分干涉法 (Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar, DInSAR) 為利用2至4幅不同時間、相同區域之InSAR影像，獲得此時間差內目標物的位移。因干涉影像的相位資料包含了變形位移及地形效應，因此藉由相減此兩張InSAR影像消除原始地形效應，便可獲得此時間差內目標物的變形位移變化。DInSAR量測地表位移的相位變化遠大於地形造成的相位差，因此此技術對於測量地表變形具有相當高之敏感度和精度，可獲得公分級的準確度，現今多用於監測同震變形 (例如2016美濃地震同震變形)、火山噴發與地層下陷等地表變形。臺灣地區由於地形高低起伏及植被的影響，易因雜訊過高而較不易產生良好的干涉圖，對長時間的變遷監測而言，可能無法確保良好正確的成果，因合成孔徑雷達影像品質的好壞受時間基線、空間基線、影像Doppler中心頻率差異及地形坡度等影響，當雷達影像品質不好時便會失去影像同調性，進而影響結果之精度，因此便改良發展出合成孔徑雷達差分干涉技術。

本文所使用之合成孔徑雷達干涉技術 (Interferometry Synthetic Aperture Radar, InSAR) 為利用衛星繞行軌道的方式，拍攝同一地區不同時間的SAR影像，SAR影像紀錄了振幅及相位之複數資料 (Complex Data)，振幅反映回波的強度，與地表坡度及平滑程度有關，相位反應天線和地面目標物的距離、大氣延遲效應及電磁波和地表的交互作用。利用振幅比

對可做影像套和，再利用相位資料處理干涉，因距離變化會造成雷達波訊號產生相位差 (phase difference)，此相位差會以干涉條紋 (fringe) 的形式呈現，便可利用相位值的差異來獲取地表三維資訊，並且利用衛星側視的三角幾何條件，以干涉技術 (Interferometry) 獲得地表高程資料。

美國 SEASAT 衛星發射升空，揭開了 SAR 時代的序幕。SEASAT 為美國 JPL/NASA (Jet Propulsion Laboratory/National Aeronautics Space Administration) 第一個以雷達影像來研究地球的太空任務，於 1978 年 6 月 28 日發射，但於同年 10 月 10 日後因電路系統故障而停止運作。1991 年歐洲太空總署發射裝置 VV 極化 (即雷達波垂直發射垂直接收)、C 波段合成孔徑雷達系統之 ERS-1 衛星，在 ERS-1 之早期任務中 (1991–1995 年)，使用者可選擇重複週期為 3 天、35 天或 168 天之 SAR 影像對。而在 1995 年 ERS-2 發射後，其與 ERS-1 所組成的協力式任務 (Tandem Mission)，可提供僅相差 1 天的影像對，此任務主要目的是希望藉此獲得全球的地表 SAR 觀測資料，並能在縮短資料時間間隔之情形下，增廣其大地監測應用領域，但 ERS-1 已於 2000 年 3 月停止運作。ENVISAT 為歐洲太空總署為延續 ERS-1/2 之地球觀測任務，於 2002 年 3 月所發射之衛星 (圖 5)。ENVISAT 為太陽同步衛星，飛行高度約 800 km，重複觀測週期為 35 天 (同 ERS-1/2)。ENVISAT 上共載有 10 個載具，其中包括合成孔徑雷達系統，名為 ASAR (Advanced SAR)，為多極化雷達。而 ALOS 衛星於 2006 年 1 月 24 日發射成功，並於同年 2 月 16 日拍攝第 1 幅影像 (圖 6)。ALOS 衛星為日本地球觀測衛星計畫中，負責針對陸地區域進行觀測的衛星，其主要工作為製圖、環境監測、災害監測及自然資源調查等。ALOS 衛星為太陽同步衛星，平均航高 691.6 km，軌道與赤道傾斜角 98.2° ，其軌道週期為 46 天，並可高速處理大量之資料，以及提供高精度之衛星拍攝位置及姿態。

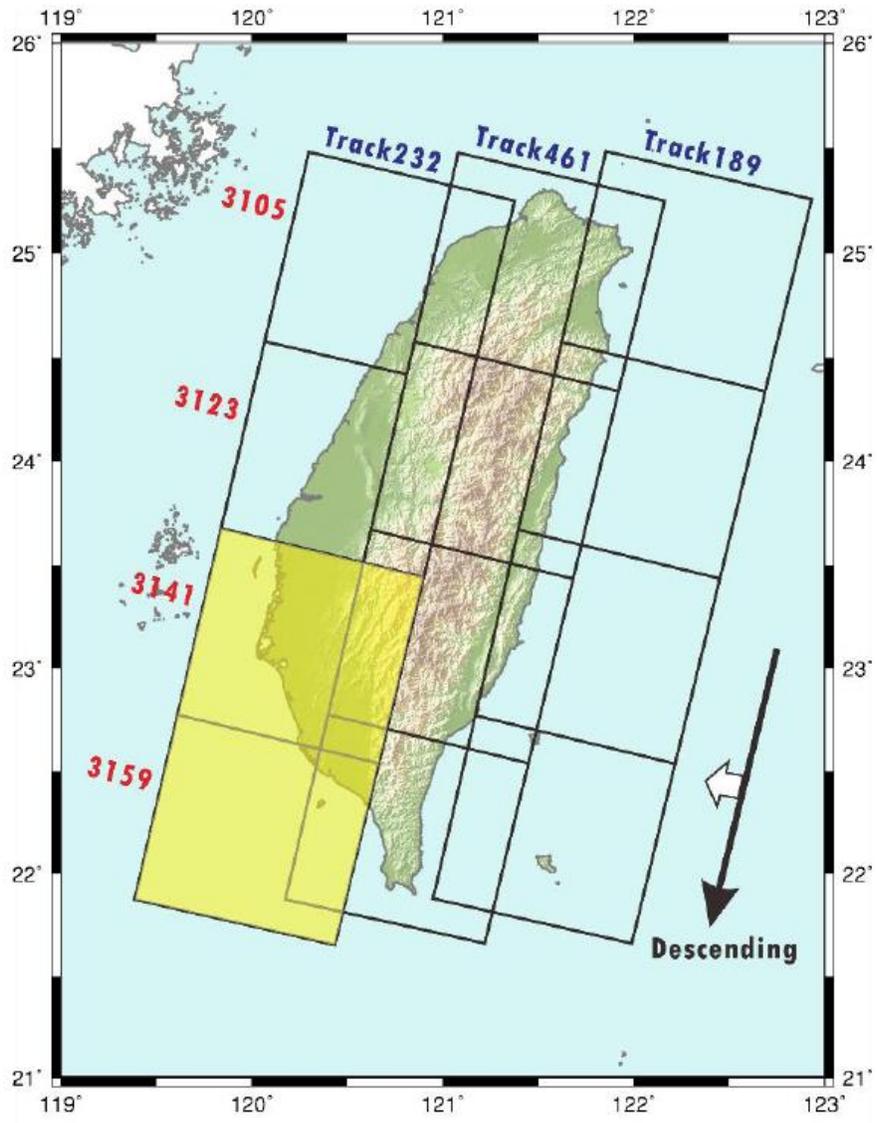


圖5、ERS-1/2及 ENVISAT衛星選取區域涵蓋示意圖（降軌），以本圖為例，衛星軌道 239，像幅編號 3141及 3159。

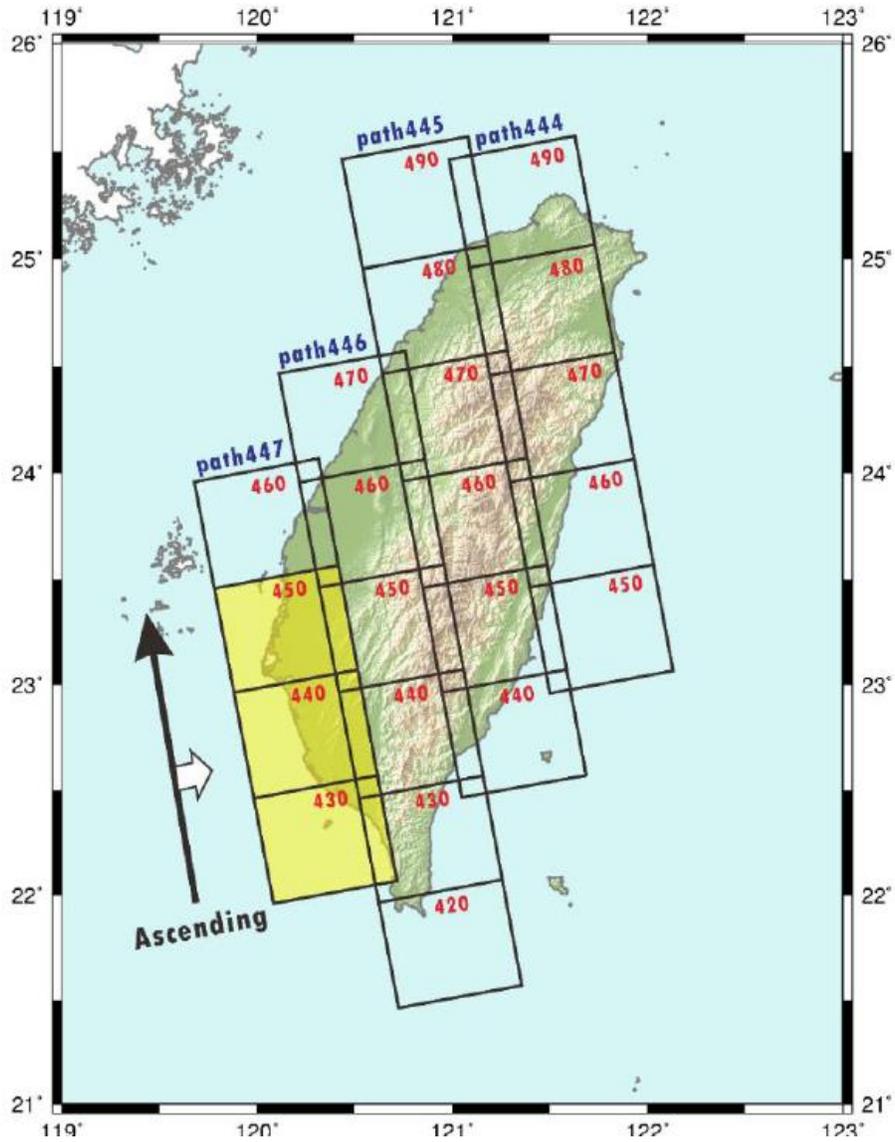


圖6、ALOS衛星選取區域涵蓋示意圖（升軌），以本圖為例，衛星軌道 447，像幅編號 430至 440。

（二）GNSS 連續觀測資料解算與品質管控：

於解算軟體方面，目前氣象局有兩套 GNSS 資料解算系統，一為 GAMIT/GLOBK 軟體，另一則為 2014 年引進之 GIPSY/OASIS (GPS Inferred Positioning System/ Orbit Analysis and Simulation Software)，兩套軟體在解算的功能與結果上各優劣有不同。為確保解算成果之正確性，將針對不同的解算需求而實行不同的解算策略之成果做比較，其中包含解算框架的差異、固定站選取之差異等等。為力求標準化解算流程，並將解算策略公開於成果報告中以供後續資料使用者使用。其中 GIPSY 相較於 GAMIT/GLOBK 軟體解速度快非常多，因為其多向修正模式取自 JPL 所給予固定模型，無須自行解算或發展因此節省時間，應用於類似 2018 年 2 月 6 日花蓮近海相似型態之地震序列之同震位移解算非常有效益，可以避免規模較大之前或餘震影響真正的主震同震位移，但缺點是其靈活運用度較低，且容易造成精度甚高的假象，因此解算策略的使用是資料結果完整正確的重要因子。無另外雜訊研究 (noise analysis) 與分析是提升資料品質的一種方法，在多數 GPS 時間序列的研究中，僅將觀測資料的誤差視為與觀測時間無關 (time independent) 的白雜訊 (white noise，或稱全頻等幅雜波)，因為白雜訊的數值模型及計算較為容易，藉由大量觀測資料即可削減其影響，但若不考慮與時間相關 (time dependent) 之色雜訊 (color noise) 的存在將會低估地殼變形速度的誤差值。尤其是地殼變形率較低的地區測得的 GPS 位移量很小，若低估誤差可能會導致地殼形變大小及方向上的錯估，這時考慮色雜訊的影響就格外重要。因此，分析 GNSS 時間序列上的誤差類型及雜訊特性，建構適合的模型，以期正確估算各項模型參數及其誤差值，進而計算地殼變形量或運動速率。另外，本局目前所有 GNSS 連續觀測站都有進行透空度圖和 QC 時間序列的繪製來監控資料品質。以上方法都可以有效確立解算結果之正確性，以期未來找出可能的震前異常，並做為臺灣地區地震潛勢評估之依據。

（三）汶川地震的啟發應用於臺灣之地震前兆等相關研究：

地震專家普遍認為引發地震的原因在於龍門山斷裂帶，也就是印度板塊往北推進，向歐亞板塊擠壓並不斷地向亞洲板塊下插入，導致青康藏高原迅速上升，並在高原的邊緣形成了地震多發的斷層，其中就包括龍門山斷層。如果斷裂每年運動數公分 (利用 GNSS 測出)，每隔 50 公尺至 70 公尺，積聚的應力和能量就能產生一次芮氏規模 7 以上的大地震。

由于汶川震源較淺，而且震源機制為向東的逆沖運動，加上震區土質鬆軟，地震波向東能傳播很長距離，正是這次地殼收縮過程造成了這場地震。汶川位於龍門山斷裂帶上，這一地震帶非常活躍，半個世紀以來已發生 7 級以上的破壞性地震多達 10 餘次，距離汶川不遠的松潘附近地區曾於 1938 年和 1976 年發生過 7 級以上的大地震。不過也有專家推斷中國推動西部大開發以來，四川修建的大量水庫可能誘發地震。四川地礦局區域地質調查隊總工程師范曉稱這次地震有可能是紫坪鋪水庫蓄水引發的，范認為這次汶川地震符合典型水庫誘發地震的 3 個指標性條件，分別為高壩大庫（壩體高、水庫容量大）、水庫建於活動的地震斷裂帶上及後來發生了芮氏規模 6 以上地震；但是長江三峽工程開發總公司樞紐管理部門的人員否認了這種可能。美國的地質學家也認為這種說法有一定的可能性，他們的研究認為紫坪鋪水庫中水的壓力可能削弱附近的北川斷層，額外的壓力裂開了斷層線，水本身也會滲透進斷層下數公里，從而加劇斷層的斷裂，這可能讓汶川大地震發生的時間提前了數十到數百年。但是真正的影響可能還需要更長時間的觀察才能做出結論。

在該次嚴重地震前，民間一直出現各類異象，被視為地震徵兆的憑證，但它們與地震的關連性仍有待考證。2008 年 5 月 10 日，四川綿竹市西南鎮檀木村（距離震央不到 100 公里）出現了數十萬隻蟾蜍遷徙的現象。中國工程院院院士周福霖稱，震前的動物異常反應是科學的，敏感的動物會察覺到地震變化；然而動物除了對地震會有敏感反應外，亦會對其他自然現象產生敏感反應。因此蟾蜍遷徙只能作為可能發生地震的參考，並不能作為震前的可靠預測。有關汶川地震前的預報研究亦被重新關注。2006 年，陝西師範大學科學家發布研究論文，其中利用川滇地區 25 次地震的數據，預測 2008 年川滇地區極有可能發生大於 6.7 強烈地震。而在 2007 年 7 月 17 日，中、歐和美地科學家亦在權威地質專刊《構造》（Tectonics）中發表文章，指出北川和彭灌斷層具有造成災害性地震的潛能。而汶川附近地區從 2005 年至 2007 年連續大旱，符合民間所謂「大旱後 1 至 3 年半出現 6 以上地震」的說法。更有學者認為如果當局掌握地震前的反常現象（氣壓、溫度、降雨等），應能準確預測。根據台灣衛星福爾摩沙三號的觀測，地震前 1 到 5 天，震區上空的電離層平均密度驟降一半。

地球物理資料與前兆觀測息息相關，雖說目前仍無地震預測的方法，但藉由地球物理資料觀測地震前兆卻是有可能的。本次汶川地震研討會之與會的許多研究學者中，對地震前兆多有著墨，有許多更是地化學者，因此地球物理觀測方法是重要的。以本局目前有的

地球物理觀測資料，可細分為：GPS 連續觀測資料、地震地下水觀測、重力觀測、磁力觀測、電離層監測及應變儀觀測等等，這些亦是日本地球物理觀測資料的重點項目。圖 7 為臺灣地區目前本局所有之地震與地球物理資料觀測網，其各有不同的用途，可用於強震監測、地震發布與前兆觀測。簡而言之，相較於中國，本局擁有相當豐富的資料可以做地震前兆的相關研究。

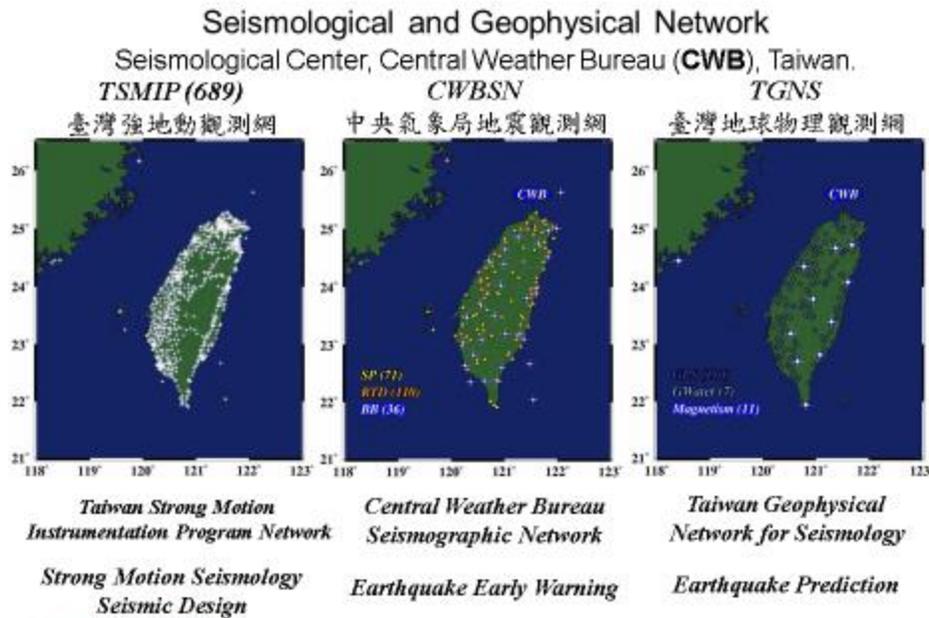


圖 7、中央氣象局地震與地球物理資料觀測網。

(四) 思考地質野外考察的重要性：

「地球科學」這個學門，可說是本世紀新興的科學領域，由於新技術、新工具的不斷發展，我們對地球和宇宙環境的瞭解愈來愈多，也愈來愈深入，因而使得地球科學知識產生了驚人的成長。經過數十年的發展，地球科學已經成為一個具有完整體系的學門了。不同於傳統自然科學，地球科學有其獨特的特性，使其不論是在研究方法、研究對象及研究結果的應用上，都有別於其他科學。美國 Ohio 州立大學的 V. Mayer 正在極力推廣以「地球行星」為主要架構的科學課程計畫，他認為，地球科學至少能提出三方面的貢獻，

是其他自然科學所不能及的，分別為：(1) 哲學方面的貢獻：地球科學研究的領域廣泛，在時間上可以延伸至數十億年以上，在空間上則可擴及整個宇宙，因此能使我們瞭解自己在宇宙時空中的地位。這種對廣大宇宙的認知，使人類很難再有藉口自我膨脹，因而消除了自我中心主義的思想，油然產生珍惜資源及愛護環境的情操。(2) 方法學方面的貢獻：地球科學面對的研究領域，在空間上是充滿無數變因及交互作用的開放系統，在時間上是動輒上百萬年的長期變化，大部分都是無法在實驗室中重現的。因此地球科學的研究方法通常具有歷史性及敘述性，而常運用觀察、描述等方式來搜集並呈現資訊，在解釋真實自然現象時，這往往是唯一的方法。(3) 概念方面的貢獻：地球科學藉著最新科技的協助，獲得了許多對地球環境的整合性資訊，使得我們首次能將地球視之為一個整體的系統，以這樣的角度來看地球各個次系統發生的變化，以及其間的交互作用，更進一步，能因此逐漸瞭解全球變遷的機制，為人類生存的環境尋得永續利用之道。

在參與了本次汶川地震相關的地質考察後野外後，發現野外考察的確有其重要性。地球科學既然強調對自然環境的體認，並注重以觀察與描述的方法來瞭解自然現象，則地球科學中就少不了在自然環境中實地的體驗活動，這種自然體驗的活動在地質學的訓練中早已行之有年，即「野外考察實習」，透過野外的考察活動，學習者能得到最直接的體驗與最具體的學習。

若能綜整上述方法相互配合，將有助於瞭解對臺灣不同地區之可能構造形式或分析斷層活動度，進一步評估該區之地震潛能，作為提供地震危害度分析之重要依據。

三、短期交流和與會心得

中央氣象局擁有豐富的地球物理關資料，相較於臺灣其他單位，其中GNSS連續觀測站為全臺之最，有160個觀測站，且分布均勻，對於地球科學研究相當有助益。GNSS連續觀測的資料可以有效地用於震前、同震和震後變形之相關研究，獲知地殼應變累積、能量釋放過程及震源斷層之力學性質。另外，GPS時間序列的資料中也包含了許多有用的訊息，除了最顯著的板塊運動訊號之外，還有許多可能源自固體潮、季節更替之不同週期的微小變化，或是時間相關的誤差、斷層無震滑移的訊號等。藉由GPS資料分析座標變動與時間、空間的關係，配合時間序列分析（Time series analysis）及其他相關研究，可掌握臺灣地區地殼變形的時空變化。而地震資料本身直接提供了有利證據用為判定活動斷層的位置，尤其是存於地殼中的盲斷層（Blind fault），致災潛能最高。

而本局之地震觀測網在1991年後進入細緻化的地震觀測時代，觀測效能已進入微震觀測程度。尤其於2005年後開始建置的新一代地震觀測網，除著手更新現有即時地震觀測站之外，更新建置了高品質的井下地震儀觀測站，與東部海域海底地震觀測站，大幅提升地震紀錄品質與擴展地震監測範圍，資料豐富可用於地震速報、防災或是研究，且可偵測到的最小地震規模（最小完整地震規模， M_c ）下降至1.5以下。發生於2016年高雄地區的美濃地震，就是一個相當好的例子。該區的地殼變形速度極快約50~55 mm/yr，但卻極少有地震，在過去的前人研究都認為是一個不易孕震的區域，然卻發生了大樓倒塌的事件並導致100多人的死亡，因此美濃地震就是一個類似於集集地震的例子。今年(2018)年發生在花蓮外海的地震也造成了17人死亡與上百人受傷、建築物倒塌等等。若能藉由正確地估計震前、間震與同震之地殼變形並將其應用於地震活動分析中，找出臺灣各區的構造形式與可能的高孕震潛能地區，於未來更可應用於前兆觀測與探討，地震預警和地震防災。

雖然蔡員的研究領域重點著重於地球物理相關，例如地震、火山、地殼形變等等，除了對於研究本體的單純性質外，防災減災才是更珍貴的後續價值。本次的短期交流所獲得的資訊實在太多，科技日新月異地進步，有時候很怕研究會趕不上科技的進步，到底如何才能將這些在交流過程中獲得到寶貴的訊息，加以充實完整地運用，且在研究、資料應用、後續附加價值之間之得到一個平衡點，只能誠惶誠恐盡力而之。

本次交流心得，感覺最深即是「學習，是無邊無盡的一條路」。茲將本次的交流心得

簡述如下：

1. 介紹本局在地震監測、速報、預警與地球物理的最新成果與未來方向。
2. 介紹本局之全球衛星定位系統連續觀測網資料之解算、分析，與前兆相關應用於防災相關之研究成果。
3. 瞭解國際上地球科學發展，尤其在地震前兆分析技術的開發與實際防災應用的情形及效益，作為本局未來業務規劃之參考。
4. 學習最新之GIPSY解算技術，預期可以提升GNSS定位精度，使資料有效運用於未來地震前兆等相關研究。
5. 透由參加「2018年第4屆國際汶川地震紀念研討會」並發表本局在地震監測與前兆觀測之最新成果，促進國際與兩岸交流。
6. 交流及汲取最新天然災害防災科技，應用於本局未來相關地震研究工作上。並藉由與國內外學者的討論交流，開啟未來可能合作的契機。

四、建議

參與本次短期交流，綜整後有以下幾點建議，可供本局未來研究參考之方向。

- (一) 臺灣相較其他國家地震發生頻仍，就地震監測與地震預警系統方面之實務經驗與維運技術已經相當成熟，若未來可以持續加強國際技術交流，可有效提升我國相關防災知識與技能，進而提升我國於國際社會中防災領域的地位。
- (二) 就地球物理資料方面，我們缺乏研究分析之人才。本局擁有豐富且龐大的地球物理資料庫，奈何原始資料的維護與測站維運就已經消耗許多人力資源，無法將寶貴的資料作進一步的分析做更妥善的利用，相當可惜，如何重新分配人力資源，或是化繁為簡以增加多餘的人力資源可用作研究之用，是本局地震中心目前亟亟加強的地方。
- (三) 相較於其他國家，臺灣擁有更高之全球衛星定位系統（GPS）連續觀測記錄網，因此著力於活動板塊界之地殼變形觀測與大區域構造之探討。若未來能對於GPS連續觀測資料與分析方法有進一步的交流機會，可互相激盪出更多研究模式。
- (四) 久性散射體合成孔徑雷達干涉（PS-InSAR）技術可以用於解釋板塊活動、監測斷層活動、計算區域應變場與山崩土石流之監測。考慮斷層活動與降雨量（流體）之間也有相關性，而斷層活動又與地震活動相關度甚高，若能更進一步地利用綜合反演模式模擬，配合地震活動度分析結果，可有效了解台灣各地區可能之孕震機制，提供孕震過程及震源力學研究的重要資訊，作為地震潛能評估之依據。目前該技術由於圖幅是免費且是目前潮流的研究方法，建議本局可以鼓勵同仁學習。
- (五) 地球科學的本心實踐在大自然中就是野外地質考察，本局在地震研究方面肩負著地震速報發布與預警減災等相關重責，但有時因缺乏實踐（如野外考察等），所以在每次媒體採訪時會出現兩難。所謂兩難即是學術性的研究（例如地球物理、地質構造等相關資料）在相較於實用的預警速報下，似乎比較不受重視。然而地球物理學術研究是解釋每個地震成因與機制等的重要背景，在不熟悉相關研究的成果下，又需考慮媒體與民眾是否可以瞭解學術相關詞彙的情況下，就成了進退不得的尷尬局面。又例如加強地震的預警的速度除了演算法的改進，最快的是測站的增加，然而即使增加測站，建置之品質好壞最終還是回歸研究本質，將研究成果做為參考標準。建議局內考慮平衡研究與實用的重要性，研究的後端才是最重要的運用。

附錄一、交流點滴與照片

(一) 西南交通大學地球科學與環境工程學院，為本次交流的第1個地點，該棟建築還包含許多科系（附圖1）。非常感謝西南交通大學，提供非常好的辦公室（附圖2）讓我在該學區可以有一個良好的學習環境。在交流的過程中，我們也會舉辦小型的 Seminar，互相討論交流本局與該校一些共同的研究，相互學習彼此進步（附圖3）。



附圖1、建築物外觀與內部標示，可以看見現代的建築物有許多有多科系在同一棟建築中，而4F是本次造訪的「地球科學與環境工程學院」，下面細分許多科系。



附圖2、我的辦公室！有非常大的董事長椅子，有窗戶可以看到外面，拍照當時剛好國立臺灣大學的胡植慶教授、中國交通西南大學的陳強教授與楊瑩輝教授在我「暫時辦公室」討論。



附圖3、小型交流會，在西南交通大學訪問時，除了學習之外，也常常有小型的交流討論會，參加的對象大多是學生，及訪問學者、教授等等。仔細看還可以看到有外國學生喔！

(二) 成都的生活與日常。因為本次的短期交流內容相當豐富，所以把成都東南西北跑了一遍。西南交通大學位於雙流國際機長的正北邊，汶川紀念研討會的會場則在機場的東邊，而成都理工大學在市中心的東北側，加上後來的地質考察，在此次交流中總住了4間不同的旅館（附圖4），也等於把成都繞了遍。且無論去到那個大學交流，一定有一餐就是有名的麻辣火鍋（附圖5），相當有趣。



附圖4、我在成都天氣晴～總共住了4間不同的旅館。其中有一張夜景剛好可以看到成都理工大學正門的霓虹閃爍，頗有異國氣氛。但是無論哪間旅館，價格便宜或是貴，重點是每一間都「沒有冰箱」，這算是我觀察到最有趣的現象之一了！

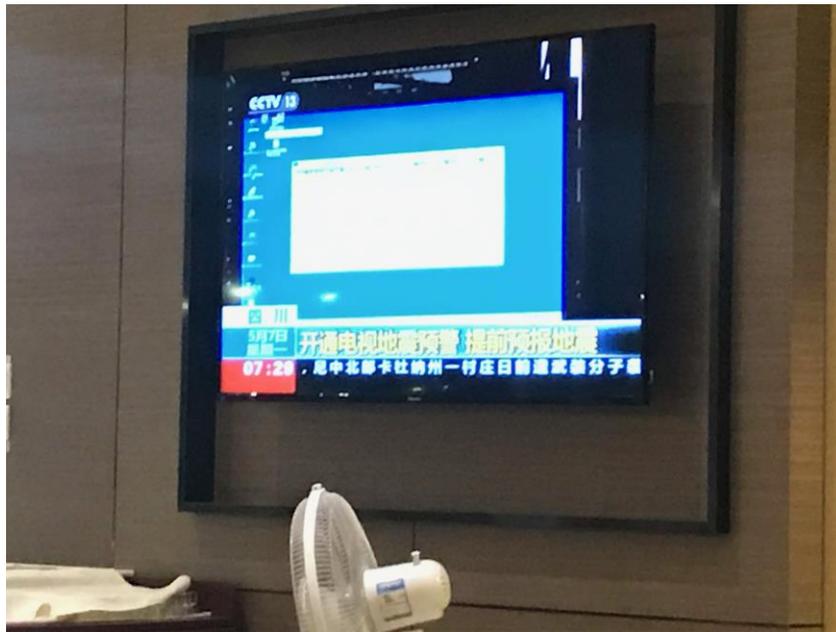


附圖5、正宗四川麻辣火鍋，紅到一看就好辣～道地的食物，增交了學術交流的樂趣。

(三) 國際研討會氣場龐大，汶川地震國際研討會舉辦地點在成都新世紀城區的holiday Inn 飯店中(附圖6)。新世紀城區在過去原本是一片小丘，後整體開發成「新世紀城」，有點類似臺灣都更的概念，該區最多的就是高樓商業辦公建築與摩登飯店。因為汶川地震逢10週年，任何時候的電視新聞都可以看到相關報導(附圖7)，宣傳與宣導做得相當透徹。另外配合會議也有超大型的救災展覽(附圖8)，令人嘆為觀止！當然，每個會議廳都用相當美麗的名字命名，我第一日發表演講的講廳名字為「蜀漢廳」，很有中國藝術感，廳內更富麗堂皇，每個位置都有擺放紙筆與瓶裝水，可見大會於此次會議用心至極(附圖9)。當然也有海報廳，這算是會議裡面最美中不足了，本次的海報發表數量不多，且時間排定較為混亂，但是還是有值得觀摩的資訊(附圖10)。



附圖6、會場註冊大廳，雖不是大型的地球物理年會，與會的人亦不少，我還遇到許多日本與美國的教授。



附圖7、在飯店用早餐時飯店正在播放晨間新聞，當時距汶川地震10週年約還有1星期遠，但各家電視台都不停輪播相關新聞，重點都是科普、重建與相關研究成果，此畫面剛好談到地震預警系統。



附圖8、為汶川地震10週年所舉辦的展覽，主題是消防救災。主辦單位把非常少見的大型機具全部放置現場，因為無法一一拍攝，因此從場外拍整體照，但展覽內容其實相當豐富。



附圖9、會議廳之一「蜀漢廳」，每個位置的紙筆與瓶裝水，明亮乾淨，可見主辦單位的用心。



附圖10、汶川研討會的海寶展示廳，燈光較為陰暗，可以看見有不少「空白版」，表示該海報報告者並未張貼。本次整體會議的安排唯一美中不足的就是海報展區，因展廳不大但擠入大量海報，且無規定講者需在海報展示時之確切時間，因此出現許多「缺席」，但是仍有內容相當精采的海報。

(四) 成都理工大學的防災羈留研討會舉辦的也很正式，甚至還有媒體前來採訪，並簽訂合約等等，代表著不同的政府機關共同合作邁進（附圖11），後續的野外考察也是精彩可期，說起來我應該拍了有一百張野外照片，但最驚人的就是汶川地震造成的巨大土石流（附圖12），目前仍在活動中，只是移動較為緩慢，仍須持續監控。我們也前往一個汶川地震後被保存下來的國小，有點像是921集集地震後所建置的博物館一樣。震災之後，所可以用於教育等相關物件，仍被好好的保存著，也提醒著我們大自然力量的偉大，與我們應有的敬畏。很感謝有機會可以有這次行程豐富的兩岸交流，從學術交流至風俗民情，希望未來仍有機會進行更深入的交流。



附圖11、於成都理工大學防災交流研討會的開幕式之一，簽訂合作協議。成都理工大學最有名的就是地質學科，且將其良好應用於防災，此簽約儀式對會議而言相當具代表性。



附圖12、汶川地震後的土石流現場，該區目前是管制進入的，因土石流還是每年以數公分的緩慢移動速度，仍存在危險性。本次野外考察有特別申請進入許可，照片外是有圍籬隔開的，但身為科學人的動力，大家還是興奮爬進去。每個野外考察點都會有人以英文與中文分別解說一次，且有碩士班或是博士班學生協助英文解說，常常看見他們手中都拿著準備好幾天的講稿，可見中國大學對於學生素質訓練相當重視。